اثر پرکننده بر ویژگی‌های حجمی و غشای قیری بتن‌آسفالتی*

(یادداشت پژوهشی)

سعید غفارپور جهرمی[۱]   علی خدایی[۲]

چکیده پرکننده کوچکترین بخش مصالح سنگی بتن آسفالتی است که با پرکردن فضاهای خالی، به دلیل نرمی، ویژگی های سطحی و ترکیب شیمیایی می‌تواند نقش یک ماده فعال واکنش‌زا را بازی می‌کند. پرکننده بخش کوچکی از بتن آسفالتی را تشکیل می‌دهد، ولی با توجه به توانایی جذب به نسبت زیاد قیر، تغییرهای جزئی در مقدار و یا ویژگی های آن می‌تواند،روی نقش قیر به‌عنوان یک ماده چسبنده و پایدار کننده مصالح سنگی اثر بگذارد. یکی ازعامل های تعیین کننده کم‌قیری یا پرقیری مخلوط‌های بتن آسفالتی، ضخامت غشایی است که می‌تواند معیاری برای ناپایداری مخلوط باشد. در این پژوهش با به کارگیری دو گونه پرکننده با ویژگی های هندسی، فیزیکی و شیمیایی متفاوت، اثرگذاری آنها بر نسبت‌های حجمی و ضخامت غشایی مخلوط‌های بتن آسفالتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. پرکننده های مورد بررسی شامل سیمان پرتلند و گرد سنگ آهکی هستند که هریک در دو سطح ویژه و نرمی متفاوت در ساخت نمونه‌های مارشال استفاده شده و آزمایش می شوند. همچنین بر اساس تعریف های معمول و جدید از ضخامت غشایی، اثر نوع، میزان و نرمی پرکننده بر ضخامت غشایی مورد بررسی قرار می گیرد. نتیجه های این بررسی نشان می‌دهد پایداری مارشال و نسبت های حجمی مخلوط بتن آسفالتی مانند وزن مخصوص، حجم منفذها، جذب قیر و قیر بهینه،افزون بر نوع پرکننده به سطح مخصوص و نرمی آن نیز وابسته است. همچنین ضخامت غشایی با حجم منفذهای سنگدانه‌ها و حجم هوای مخلوط وابستگی نزدیکی دارد.

واژه‌های کلیدی بتن آسفالتی، پرکننده، نرمی و سطح مخصوص پرکننده، نسبت‌های حجمی، ضخامت غشایی

Effect of Filler on Volumetric Properties and Film Thickness of Asphalt Mixtures

S. Ghaffarpour Jahromi   A. Khodaii

Abstract *Mineral filler is the finest fraction of aggregate used in concrete asphalt that can fill the void with effective interface in the mixture. It is essential for producing a mixture which is dense, cohesive, durable and resistance to the water penetration. Small change in the amount or the properties of the filler can cause the paving mixture to appear excessively dry or rich and film thickness can be a good parameter to predict concrete asphalt stability. It is generally believed that an asphalt paving mixture should have an adequate asphalt film thickness around the aggregate particles to ensure reasonable durability (resistance to aging) of the mixture. This study focuses on comparing volumetric properties and film thickness of the asphalt concrete using different fillers with a view to the geometry, physical and chemical properties. The fillers are limestone mineral and portland cement that used in two different specific surfacein the construction of Marshal test specimens. The range of the changes depends on the filler interaction with bitumen. Volumetric properties were investigated in the study are density, VFB, VTM, VMA. Other properties are Marshall stability, flow, optimum binder and film thickness. Results show that kind, content and filler properties have different effects on the volumetric properties and film thickness.*

Key Words Asphalt Mixtures, Filler, Volumetric Properties, Film Thickness

---

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۷/۱/۲۱ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۹/۳/۱۶ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسوول: استادیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

(۲) دانشیار، دانشکده‌ی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

مقدمه

در سال‌های اخیر، بررسی کارهای پژوهشی گوناگون نشان می دهد، که همه پژوهشگران بر ناکافی بودن معیارهای حجمی در طراحی مخلوط‌های بتن آسفالتی نظر دارند و نمی توانند تنها با این معیارها از دوام و کارآیی روسازی‌های آسفالتی در تمامی شرایط اطمینان حاصل کنند [1]. تغییرشکل‌های همیشگی در لایه‌های روسازی ناشی از جمع شدن کرنش های مومسان در اثر تکرار بارگذاری و باربرداری است و با توجه به رشد فزاینده حجم و وزن خودروها ، روی شرایط بهره‌برداری از راه اثر می گذارد. نسبت‌های حجمی و به ویژه فضای خالی مخلوط(VTM)، از عامل های مهم در ایجاد این پدیده است و کاهش آن می تواند میزان تغییرشکل‌ها را افزایش دهد [2]. خستگی و دوام مخلوط‌های بتن آسفالتی ارتباط مستقیمی با حجم منفذهای سنگدانه‌ها (VMA) و حجم قیر در مخلوط (VBE) دارد. تا حد مشخصی با افزایش حجم منفذهای سنگدانه‌ها (VMA) و حجم قیر در مخلوط (VBE) می‌توان عمر خستگی و دوام را افزیش داد، ولی از سوی دیگر مقابل با افزایش بیش از حد VMA و VBE، تغییرشکل ماندگار نیز افزایش یافته و مقاومت در برابر گودی زیرچرخ (Rutting) کاهش می‌یابد [3].

یکی از روش‌های طراحی مخلوط‌های آسفالتی استفاده از روش‌های طراحی حجمی مانند روش مارشال است این روش بر معیارهای تجربی و حجمی مانند حجم منفذهای سنگدانه (VMA)، حجم هوای مخلوط (VTM)، حجم پر شده با قیر (VFB)، حجم قیر (VBE) وچگالی استوار است. در این بین VMA اهمیت بیشتری دارد [4]. کارآیی نامناسب برخی مخلوط‌های بتن آسفالتی که بر اساس معیارهای تجربی و حجمی طراحی می‌شوند، باعث شده تا پژوهشگران ضخامت غشایی قیر را نیز در ارزیابی دوام و کارآیی مخلوط‌های آسفالتی مؤثر بدانند. بنابراین درسال‌های اخیر بسیاری از طراحی مخلوط‌های بتن آسفالتی، بر اساس دستیابی به بیشترین دانسیته (کمترین VMA) و مناسب‌ترین نسبت مقدار قیر به سطح جانبی سنگدانه‌ها (ضخامت بهینه غشای قیری) انجام شده اند [5-10]. سطح جانبی سنگدانه‌ها از حاصل ضرب ضریب های سطحی کم انستیتو آسفالت، معرفی کرده در درصد عبوری الک‌های مختلف تعیین می شود . رویه‌های آسفالتی در ابتدای ساخت با میانگین حجم هوا ۷ تا ۸ درصد ساخته می‌شوند و فشردگی دوباره ثانویه ناشی از کوبش غلطک یا تکرار بار ترافیک، ازتخلخل آن به صورت محدودی به مقدار ۳ تا ۵ درصد می کاهد زیرا حجم هوای اضافی در مخلوط از فشردگی بیش از حد آن پیشگیری می‌کند. اگر حجم هوا کمتر از آستانه بحرانی یعنی ۲/۵ تا ۳ درصد باشد، توانایی نهفته جاری شدن و تغییرشکل‌های ماندگار افزایش می‌یابد [11]. از سوی دیگر با افزایش فشردگی، فاصله بین سطح ذرات کاهش یافته و ضخامت غشایی افزایش می‌یابد [12].

بخش کوچکتر از ۷۵ میکرون مصالح سنگی به عنوان پرکننده شناخته می‌شود که نقش مهمی بر دوام، ویژگی های مکانیکی و نسبت‌های حجمی مخلوط دارد. از پرکننده برای پر کردن فضاها در بتن آسفالتی استفاده می‌شود که می‌تواند عملکرد خنثی یا فعال داشته باشد. در پرکننده های خنثی، ویژگی های فیزیکی مانند دانه‌بندی، بافت سطحی، نرمی و سطح مخصوص دارای اهمیت است؛ ولی در پرکننده های فعال افزون بر ویژگی های فیزیکی، بافت و ترکیب شیمیایی و اندرکنش آن با قیر، اهمیت دارد. مصالح پرکننده ها باید بدون هیچ گونه از مواد آلی و کانی‌های رسی و دامنه خمیری آن کمتر از ٤ باشد و از نظر دانه‌بندی، دست کم ۷۰ درصد ذرات از الک ۲۰۰ بگذرند [13,14]. کاربرد از پرکننده های مختلف در بتن آسفالتی موضوع جدیدی نمی‌باشد و پژوهش های بسیاری تاکنون پیرامون ویژگی های پرکننده و اثر گذاری کمی آن بر رفتار بتن آسفالتی انجام شده است. در این پژوهش از ۲ نوع پرکننده ها معمول یعنی گرد سنگ و سیمان پرتلند با ویژگی های فیزیکی و شیمیایی متفاوت استفاده می‌شود و اثرگذاری آن ها بر نسبت‌های حجمی و ضخامت غشایی مخلوط بتن آسفالتی مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.

بازبینی پژوهش‌های پیشین

استفاده از معیارهای حجمی در ارزیابی و طراحی روسازی بتن آسفالتی را نخستین بار در دهه ۵۰ میلادی Mclaod کانادایی مطرح کرد. وی برای بارنخست معیار "حداقل حجم منفذهای سنگدانه" (Minimum VMA) را در طراحی بادوام مخلوط‌های آسفالتی در قشر رویه پیشنهاد ، داد با این فرض که VMA نقش مؤثرتری و کنترل‌کننده‌ای بر رفتار بتن آسفالتی دارد و رفتار آن را در اختیار می گیرد. [15]. وی پیشنهاد کرد بر اساس روابط حجمی، وی پیشنهاد کرد باید "VMA دست کم"، ۱۵ درصد، حجم منفذها بین ۳ تا ۵ درصد، حجم اشغال شده با قیر (VFB) ۷۵ تا ۸۵ درصد و حجم قیر مخلوط دست کم ۱۰ درصد (٤/۵ درصد وزنی) باشد. او در کامل کردن نظریه خود، VMA را متناسب با بیشترین اندازه اسمی دانه‌ها دانست به طوری‌که در مصالح دانه‌ای ریزدانه، کمترین VMA از ۱۵ درصد فراتر می‌رود و در مصالح دانه‌ای درشت دانه از ۱۵ درصد کمتر است [16].

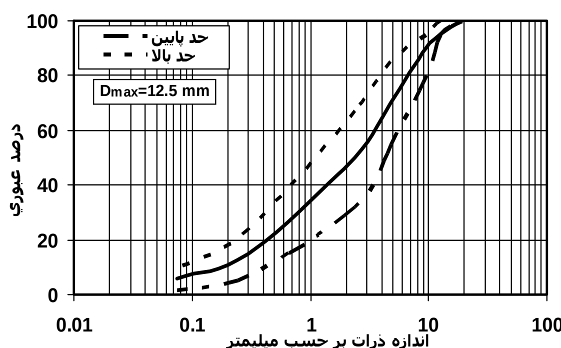
به بیان دیگر، نسبت قیر به سطح جانبی سنگدانه‌ها، عامل مؤثرتری در دستیابی به مخلوط پایدارو بادوام و در اختیار گرفتن ویژگی های آن است. این نسبت به عنوان " ضخامت غشای قیری" یا " ضریب ظرفیت قیر" شناخته می‌شود. پژوهش های Kandhal and Chakraborty با ارائه رابطه‌ای در گمانه زنی ضخامت غشایی، نشان می‌دهد که ضخامت غشای قیری وابستگی خوبی با ضریب برجهندگی مخلوط دارد و ضخامت متوسط در مخلوط‌های فشرده شده با ۸ درصد حجم هوا، حدود ۹ تا ۱۰ میکرون می‌باشد [17]. از آنجا که ضخامت غشای قیری را به آسانی نمی توان تعیین کرد ، Kandhal و همکارانش پیشنهاد کردند که معیار " VMA کمترین" را می‌توان با معیار حداقل مقدار قیری که ضخامت غشای ۸ میکرون را فراهم کند، جایگزین کرد [7]. با این حال پژوهش های اخیر نشان می‌دهد که نظریهٔ "VMA کمینه" و ضخامت غشای قیری معیارهای کاملی برای اطمینان از دوام و کارآیی مخلوط بتن آسفالتی نمی‌باشند. ضخامت غشایی وایستگی خوبی با تغییرشکل ماندگار (Rutting) دارد و VMA با دوام مخلوط وابسته است. از این رو، نسبت VMA به سطح جانبی سنگدانه به عنوان شاخص اثر گذار، در اختیار گرفتن کیفیت و دوام مخلوط پیشنهاد شده است [18]. پژوهش دیگری روی مخلوط‌های فشرده شده با ٤ درصد حجم هوا نشان می‌دهد که VMA و ضخامت غشای قیری، معیارهای مناسبی در بیان سخت‌شدگی نسبی و در اختیار گرفتن دوام مخلوط نمی‌باشند و مصالح درشت‌دانه با غشای نازکی از قیر و مصالح بسیار ریزدانه (پرکننده) پوشیده می‌شوند [19].

استفاده از پرکننده های مختلف در بتن آسفالتی موضوع جدیدی نمی‌باشد. پرکننده در بتن آسفالتی ظرفیت باربری، مقاومت فشاری و برشی را افزایش می‌دهد و تغییر شکل نسبی را کاهش می‌دهد. با این وجود افزایش بیش از حد پرکننده سبب کاهش تخلخل در مخلوط شده و کارهای فشرده سازی را مشکل می‌کند که کاهش ایستادگی را به دنبال خواهد داشت [14,20]. Richardson از نخستین پژوهشگرانی بود که اثرگذاری پرکننده های معدنی را مورد بررسی قرار داد. پرکننده افزون بر پرکردن منفذهای خالی، در ترکیب نیز اندرکنش فیزیکی-شیمیایی دارد [22]. Anani دریافت که تغییر مقدار پرکننده، به صورت مستقیم با حجم منفذها وابسته است و روی ضریب برجهندگی و نفوذپذیری را اثر می گذارد [20]. میزان چسبندگی قیر و مصالح سنگی نیز زیر اثر ویژگی های پرکننده قرار دارد و رفتار مکانیکی، میزان قیر بهینه، دوام و نفوذپذیری مخلوط به نوع قیر، ویژگی های فیزیکی و شیمیایی پرکننده وابسته است [23]. آهک گونه ای پرکننده نوعی پرکننده فعال است که با مولکول های قطبی قیر واکنش می‌دهد و با بهبود چسبندگی قیر، مقاومت کششی و ضریب برجهندگی مخلوط افزایش و تغییرشکل نسبی کاهش می‌یابد [24].

مواد و مصالح مورد استفاده

مصالح سنگی و قیر مصرفی: در این پژوهش دانه‌بندی مشخصی با بیشترین اندازه اسمی ۱۲/۵ میلیمتر بر اساس آیین‌نامه روسازی ایران، به کار رفت و مبنای ساخت همه مخلوط‌ها شد. منحنی دانه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش در شکل (۱) و ویژگی های مصالح سنگی در

جدول (۱) آمده است. قیر مصرفی در این تحقیق از نوع ۷۰-۶۰ (معادل AC-10) با ویژگی های رئولوژیکی نبابه جدول (۲) است که هماهنگی بیشتری با شرایط آب و هوایی کشور ما دارد.



شکل ۱ دانه‌بندی مصالح سنگی

جدول ۱ ویژگی های مصالح سنگی

مصالح درشت‌دانه (ASTM C 127)	
وزن مخصوص واقعی g/cm^3	۲/۶۲
وزن مخصوص ظاهری g/cm^3	۲/۶۴
درصد جذب آب	۰/۲۳
مصالح ریزدانه(ASTM C 128)	
وزن مخصوص واقعی g/cm^3	۲/۶۸
وزن مخصوص ظاهری g/cm^3	۲/۷۱
درصد جذب آب	۰/۳۲

جدول ۲ ویژگی های قیر مصرفی

نقطه نرمی		۵۴ °C
نفوذ در دمای ۲۵ درجه		۶/۳ mm
درجه اشتعال		۲۴۳ °C
نشانه نفوذ		+ ۰/۴
شکل‌پذیری در دمای ۲۵		>۱۰۰ cm
نقطه شکست فراس		۱۴
افت حرارتی		۰/۰۵ %
چگالی در دمای ۲۵ درجه		۱/۰۲۵
کندروانی	در دمای ۵۰	۲۵۰۰۰۰ cSt
	در دمای ۶۰	۱۰۰۰۰۰ cSt
	در دمای ۷۲	۲۰۰۰۰ cSt
مالتین		۷۵ %
آسفالتین		۲۷/۲ %

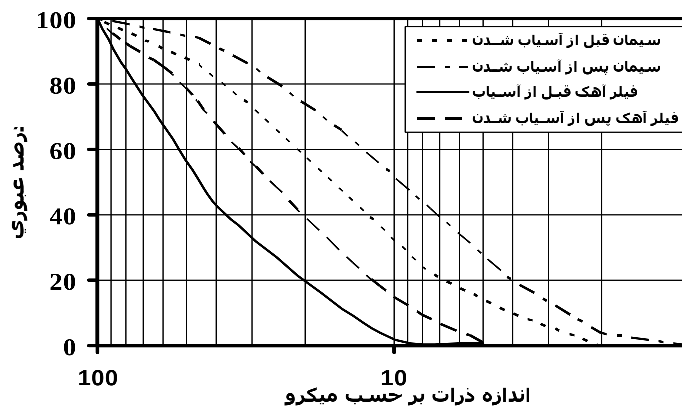
پرکننده: در این پژوهش از دو گونه پرکننده با ویژگی های فیزیکی متفاوتی مانند دانه‌بندی، سطح مخصوص، نرمی، بافت سطحی و جذب سطحی متفاوت و همچنین ترکیبات شیمیایی مختلف استفاده شد که شامل سیمان پرتلند معمولی و گرد سنگ آهک هستند. سیمان، ترکیبی از آهک، سیلیس، آلومین و اکسیدآهن با بیش از ۶۰ درصد CaO و دیگر ترکیبات شیمیایی است که افزون بر نقش پر کننده ، با قیر نیز، واکنش خواهد داد. در کشور ما بیشتر پرکننده هایی با ترکیبات آهکی در ساخت آسفالت به کار می روند که کارکرد مناسبی در بهبود چسبندگی و ویژگی های بتن آسفالتی دارد. ویژگی های هر یک از پرکننده ها در جدول (۳) و (۴) آمده است. برای دریافتن اثر ویژگی های فیزیکی و به ویژه نرمی پرکننده، هر یک از پرکننده ها با آسیاب گلوله‌ای، دوباره به مدت ۶۰ دقیقه، آسیاب شدند. آسیاب دوباره سبب افزایش سطح مخصوص و نرمی پرکننده ها می‌شود و توزیع دانه‌بندی را تغییر می‌دهد. تغییرات سطح مخصوص در جدول ویژگی های پرکننده ها و تغییر دانه‌بندی در شکل (۲) آمده است.

جدول ۳ ویژگی های فیزیکی پودرسنگ

معدن استخراج شده		اطراف ساوه
چگالی ویژه		۲/۷۲
سطح مخصوص	قبل از آسیاب شدن	۱۰۵ m^2/kg
	پس از آسیاب‌مجدد	۲۳۵ m^2/kg
بافت سطحی		زبر- گوشه‌دار- مکعبی

جدول ۴ ویژگی های فیزیکی شیمیایی سیمان

کارخانه		سیمان تهران
تیپ سیمان		تیپ I
چگالی ویژه		۳/۱۵
سطح مخصوص	قبل از آسیاب شدن	۳۲۵ m^2/kg
	پس از آسیاب‌مجدد	۵۴۵ m^2/kg
بافت سطحی		نرم- ناهموار



شکل ۲ توزیع ذرات پرکننده پیش و پس از آسیاب دوباره

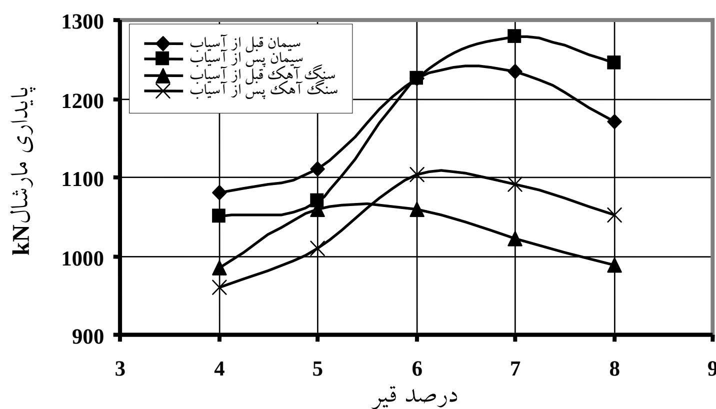
روش ساخت نمونه‌ها

در ساخت همه نمونه‌ها، دانه‌بندی مصالح سنگی، میزان پرکننده و نوع قیر ثابت درنظرگرفته شد؛ ولی نوع و ویژگی های پرکننده و همچنین میزان قیر تغییر کرده است. برای این هدف یک بار از پرکننده گرد سنگ و سیمان با دانه‌بندی و نرمی اولیه و بار دیگر از پرکننده ها پس از آسیاب دوباره استفاده شد. آیین‌نامه روسازی، نسبت وزنی پرکننده به قیر را به ۰/٦ تا ۱/۲ محدود کرده است و در این پژوهش، میزان پرکننده ٥ درصد وزن مصالح سنگی درنظرگرفته شد و همه نمونه‌ها نیابه روش مارشال (ASTM-D1559) ساخته شدند. بر اساس وزن کل مصالح سنگی و پرکننده ، درصدهای مختلف قیر از ٤ درصد تا ۸ درصد (با نمو یک درصد) انتخاب وبر پایه این درصدها در نمونه‌ها ساخته شدند. نمونه‌های مارشال قطری برابر ۱۰۲ و ارتفاعی حدود ٦٣ میلیمتر دارند و با فرض سطح آمد وشد سنگین، همه نمونه‌ها از هر طرف با ۷٥ ضربه با دستگاه ، فشرده شدند. سنگدانه و قیر پیش از مخلوط شدن به ترتیب تا دمایی حدود ۱۷۰ و ۱٤۰ درجه گرم و در دمایی حدود ۱٤٥ درجه فشرده شدند. وزن مخصوص و درصد جذب قیر، روی مخلوط بتن آسفالتی نکوبیده، به روش رایس ASTM-D2041 تعیین و درصد فضای خالی نمونه‌ها نیز، به روش انستیتو آسفالت، ایجاشد.

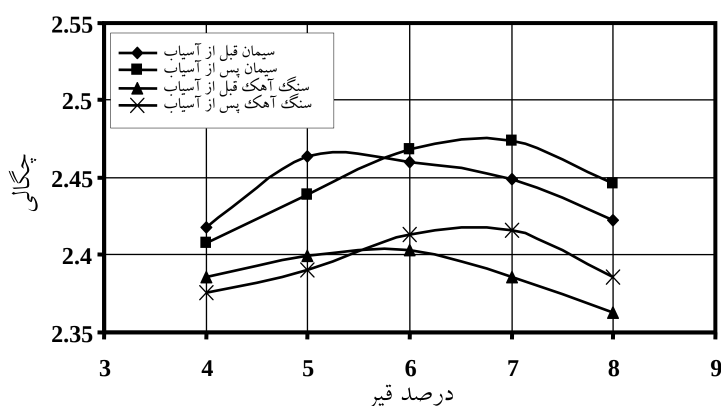
اثر گذاری پرکننده ها بر ویژگی های مکانیکی و نسبت‌های حجمی

نتیجه های حاصل از تحلیل آزمایش مارشال و رایس شامل پایداری، دانسیته، حجم منفذهای و حجم هوای مخلوط بر حسب درصد قیر در شکل (۳) تا (٦) آمده است. همان گونه که در شکل (۳) مشخص شده است، در همه پرکننده ها، با افزایش میزان قیر(نسبت قیر به پرکننده)، محکم شدگی مارشال ابتدا افزایش یافته و سپس روند کاهشی دارد. همچنین با افزایش نرمی پرکننده ها، سطح مخصوص، افزایش می‌یابد و درصد قیر بهینه و مقاومت مارشال اندکی افزایش می‌یابد. روند مشابهی را می‌توان در اثرگذاری پرکننده روی وزن مخصوص مشاهده کرد (شکل(٤)). با افزایش میزان قیر، ضخامت غشای قیری نیز افزایش یافته و با کاهش اصطکاک بین دانه‌ها باعث فشردگی پذیری بهتر مخلوط می‌شود که حاصل آن افزایش وزن مخصوص خواهد بود. افزایش وزن مخصوص، افزایش پایداری مارشال را نیز به دنبال خواهد داشت. با ادامه افزایش قیر، ضخامت غشای قیری نیز ضخیم‌تر می‌شود و با دور کردن دانه‌ها، جاگیری و قفل و بست بین آنها نیز کاهش می‌یابد و حاصل آن کاهش وزن مخصوص و محکم شدگی مخلوط است. شکل (۳) و (٤) نشان می‌دهند که اگر میزان قیر و به

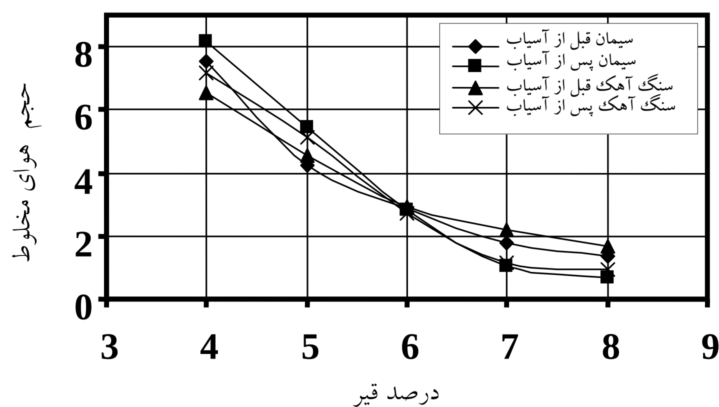
عبارتی نسبت قیر به پرکننده اندک باشد (کمتر از ۵ درصد)، نمونه‌های دارای پرکننده با نرمی زیاد (آسیاب دوباره)، استحکام مارشال و وزن مخصوص کمتری در مقایسه با نمونه‌های دارای پرکننده معمولی دارند. اما با افزایش میزان قیر، چگالی این نمونه‌ها از نمونه‌های دارای پرکننده پیش از آسیاب بیشتر می‌شود.



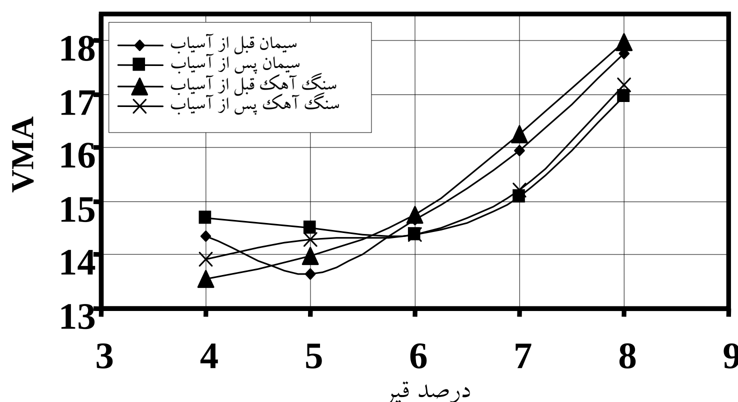
شکل ۳ تغییرات استحکام مارشال بر حسب درصد قیر



شکل ٤ تغییرات وزن مخصوص بر حسب درصد قیر



شکل ۵ تغییرات حجم هوا بر حسب درصد قیر



شکل ٦ تغییرات حجم منفذهای سنگدانه بر حسب درصد قیر

همچنین این اشکال به خوبی نشان می دهد؛ که مخلوط دارای سیمان، از مقاومت بالاتری در مقایسه با مخلوط دارای آهک برخوردارد. از آنجا که سیمان و آهک هر دو دارای ترکیبات کلسیمی (CaO) هستند، به نظر می‌رسد، سیمان به دلیل کوچکتر بودن ذرات آن (به خصوص پس از آسیاب دوباره)، سطح تماس بیشتری با قیر داشته و در نتیجه اندرکنش و فعالیت شیمیایی شدیدتری با قیر دارد.

شکل (۵) نشان می‌دهد که میزان هوای مخلوط‌های بتن آسفالتی(V_a) و منفذهای سنگدانه‌ها (VMA)، وابستگی کمتری به نرمی پرکننده ها دارند و رفتار به نسبت همانند و نزدیکی دارند. به عبارتی روند تغییرات آنها بیشتر تابع میزان قیر و گونه پرکننده است تا نرمی پرکننده ها. همه نمونه‌ها در درصد قیر حدود ٦ درصد، دارای حجم هوای یکسانی حدود ۳ درصد و منفذهای سنگدانه‌ها نیز، حدود 14.5 درصد هستند. حجم منفذهای سنگدانه‌ها (VMA) در نمونه‌های دارای پرکننده با نرمی زیاد (آسیاب‌شده) با افزایش قیر(بیش از ٦٪)، حدود ۱ درصد کمتر از نمونه‌های دارای پرکننده پیش از آسیاب است که بیانگر کارپذیری و فشردگی پذیری بهتر این گونه مخلوط‌های بتن آسفالتی است.

ضخامت غشای قیری

یکی از عامل های اثرگذار و کنترل‌کننده نابودی و خرابی بتن آسفالتی، ضخامت غشای قیری در اطراف سنگدانه‌ها است. برپایه تعریف های نخستین (Hveem and Edwards)، ضخامت غشایی به طور تجربی از تقسیم حجم مؤثر قیر بر سطح مخصوص مصالح سنگی و با رابطه زیر بیان می‌شود [25]:

$$T_F = \frac{V_{be}}{S_a \cdot M_S} \rho_w \qquad (۱)$$

در این رابطه T_F بیانگر ضخامت غشایی (میکرون)، V_{be} حجم مؤثر قیر(لیتر)، S_a سطح جانبی کل سنگدانه (m^2/kg)، M_S جرم سنگدانه (kg)، ρ_w چگالی آب (g/cm^3).

با افزایش سطح جانبی ذرات، ضخامت غشایی نیز کاهش می‌یابد. آنچه روشن است که همه ذرات مخلوط دارای ضخامت غشایی یکسانی نمی‌باشند و ذرات ریزدانه، اندود قیری بیشتری نسبت به ذرات درشت‌دانه دارند. همچنین ذرات بسیار ریز که پرکننده نیز بخشی از آن است، در قیر پخش شده و جزئی از لایهٔ اندودی می شوند. تعیین سطح مخصوص مصالح سنگی بسیار پیچیده و وابسته به روش‌های تجربی است. سطح جانبی مصالح سنگی به روش پیشنهادی انستیتو آسفالت (Hveem–Edwards)، بابهره گیری از نتیجه های آزمایش دانه‌بندی و ضرایب سطح مطابق جدول (۵) تعیین شده است.

همان‌گونه که در جدول (۵) آمده است، ذرات

ریزتر، ضریب سطح بزرگتری دارند که بیانگر سهم بزرگتر آنان در سطح جانبی است. در روشی که انستیتو آسفالت ارائه داده تنها درصد مصالح رد شده از هر الک، در محاسبات به کار می رود که برای دقت آن به ویژه برای ذرات بسیار ریز باید اندیشه کرد. از این رو، دیگر پژوهشگران نیز دقت این روش را در تعیین سطح مخصوص ذرات پرکننده، با انجام آزمایش بلین مورد مقایسه قرار داده‌اند. نتیجه های یک بررسی نشان می‌دهد که بسته به گونه و کانی‌شناسی ذرات پرکننده، سطح جانبی حاصل از آزمایش نفوذپذیری هوا (بلین ASTM C204) بین ٦ تا ١٠ برابر بزرگتر از سطح جانبی حاصل از روش انستیتو آسفالت می‌باشد [26].

جدول ۵ تعیین سطح مخصوص ذرات

اندازه الک	درصد عبوری	ضریب سطح	سطح مخصوص
۱۹	۱۰۰	۰/٤۱	۰/٤۱
۱۲/۵	۹۵		
۹/۵	۸۰		
٤/۷۵	٦۵	۰/٤۱	۰/۲٦٦
۲/۳٦	٤۹	۰/۸۲	۰/٤۰۲
۱/۱۸	۲۸	۱/٦٤	۰/٤٦
۰/٦	۲۰	۲/۸۷	۰/۵٤۷
۰/۳	۱۵	٦/۱٤	۰/۹۲۱
۰/۱۵	۷/٦	۱۲/۲۹	۰/۹۳٤
۰/۰۷۵	۵	۳۲/۷۷	۱/٦۳۸
سطح جانبی مصالح‌سنگی m^2/kg			۵/٦۰۵

آزمایش بلین روی پرکننده ها پیش و پس از آسیاب مجدد انجام شده است و نتیجه های آن در جدول (۳) و (٤) آمده است که بیانگر سطح جانبی به نسبت بزرگتری در مقایسه با روش انستیتوآسفالت است. در روش پیشنهادی Duriez ضریب سطح برای ذرات بسیار ریز پرکننده بسیار بیشتر از مقدار پیشنهادی انستیتو آسفالت است (نبابه جدول (۵) برای ذرات عبوری از الک ۲۰۰ برابر با ۳۲/۷۷ است) [27]:

$$S = 135A + 12B + 2.3C \qquad (۲)$$

در این رابطه، S سطح جانبی ویژه (m^2/kg)، A درصد وزنی کوچکتر از ۸۰ میکرومتر، B درصد وزنی بین ۸۰ میکرومتر تا ۰/۳۱۵ میلیمتر و C درصد وزنی ذرات بین ۰/۳۱۵ میلیمتر تا ۵ میلیمتر است. مقایسه روابط فوق نشان می‌دهد در تعیین سطح جانبی پژوهشگران یکسان نظر نمی دهند جدول (٦) سطح جانبی مصالح سنگی را بر اساس هر سه روش مختلف نشان می‌دهد.

جدول ٦ مقایسه سطح جانبی پرکننده ها به روش‌های مختلف

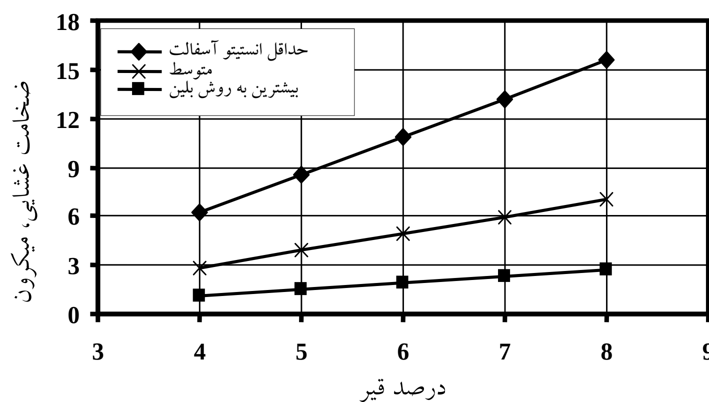
		پیش از آسیاب	پس از آسیاب دوباره
روش انستیتو آسفالت		۵/٦۰۵	۵/٦۰۵
آزمایش بلین	دارای سیمان	۲۰/۲۱۷	۳۱/۲۱۷
	دارای گرد سنگ	۹/۲۱۷	۱۵/۷۱۷
روش پیشنهادی Duriez		۹/۹۲۲	۹/۹۲۲

ضخامت غشایی وابستگی شدیدی با سطح جانبی دارد و تا کنون روش مناسبی برای تعیین مقدار واقعی ضخامت غشایی وسطح جانبی ارائه نشده است، بنابراین، نمی‌توان دقت هر روش را در گمانه زنی سطح جانبی به درستی صحیحی تعیین کرد. روش انستیتو آسفالت کمترین مقدار و آزمایش بلین، بیشترین مقدار سطح مخصوص را بیان می‌کند. به عبارتی روش انستیتو آسفالت، مقدار دست بالایی برای ضخامت غشایی ارائه می‌دهد و فرض می‌کند بخشی از ذرات بسیار ریز در قیر پخش شده و جزئی از ضخامت غشایی می‌شوند [12]. شکل (۷) وابستگی بین ضخامت غشایی و مقدار قیر را براساس کمترین، بیشترین و میانگین مقدارهای سطح مخصوص ارائه شده (جدول (٦)) نشان می‌دهد.

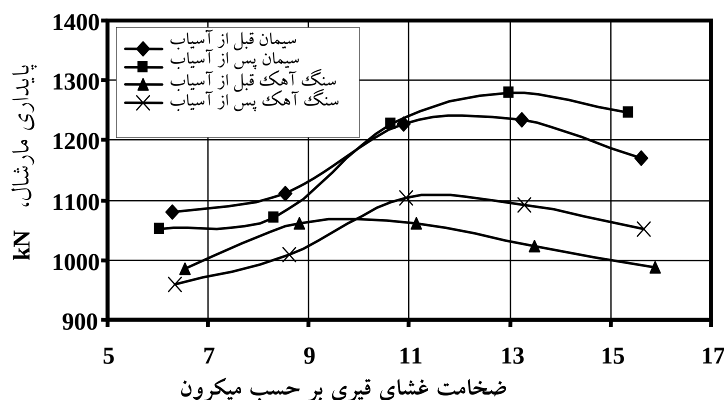
برای انعطاف‌پذیری و نفوذپذیری مخلوط‌های بتن آسفالتی، پیشنهاد شده است ضخامت غشایی بین ۸-٦

میکرون باشد. ضخامت غشای قیری دربیشتر مخلوط‌های آسفالتی بین ۱۵- ۵ میکرون است. اگر ضخامت غشای قیری اندک باشد، احتمال ترد شدن، ترک‌خوردگی و جداشدگی دانه‌ها افزایش می‌یابد و اگر بیش از حد ضخیم باشد، پتانسیل تغییرشکل‌های ماندگار مخلوط افزایش می‌یابد؛ بنابراین NCAT ضخامت ۸ میکرونی را پیشنهاد داده است [28]. بررسی پژوهش های مختلف نشان می‌دهد، هم فکری میان پژوهشگران روی روش انستیتو آسفالت بیش از دیگر روش ها است ؛ که همین دلیل، این روش مبنای مقایسه نتیجه ها قرار گرفت. شکل (۷) نشان می‌دهد بر اساس روش انستیتو آسفالت، ضخامت غشایی با افزایش قیر از ٦ به ۱۵ میکرون افزایش می‌یابد.

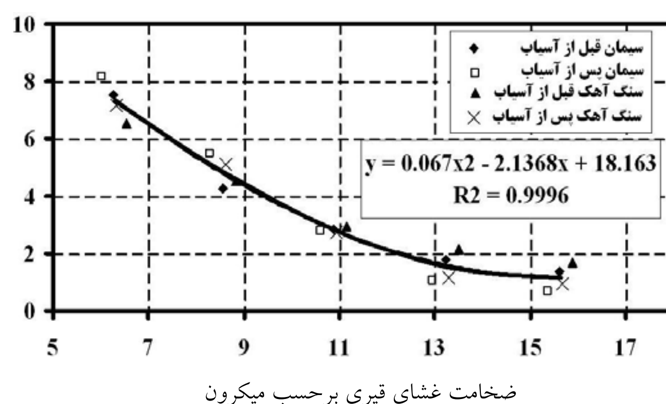
شکل (۸) تغییرات پایداری مارشال بر حسب ضخامت غشایی را نشان می‌دهد. ضخامت غشایی ارتباط مستقیمی با مقدار قیر دارد؛ به همین سبب ، تغییرات شکل (۸) مانند شکل (۳) است و ضخامت غشایی بهینه، متناسب با درصد قیر بهینه می‌باشد. شکل (۹) و (۱۰) به ترتیب بیانگر ارتباط بین حجم هوا (V_a) و حجم منفذهای (VMA)، در همه نمونه‌ها با ضخامت غشایی است. همان گونه که مشخص است با افزایش ضخامت غشایی، حجم هوای مخلوط کاهش می‌یابد؛ همچنان‌که این افزایش با افزایش حجم منفذهای مصالح سنگی همراه است. همچنین وابستگی خوبی بین حجم هوا و ضخامت غشایی در همه مخلوط‌ها وجود دارد.



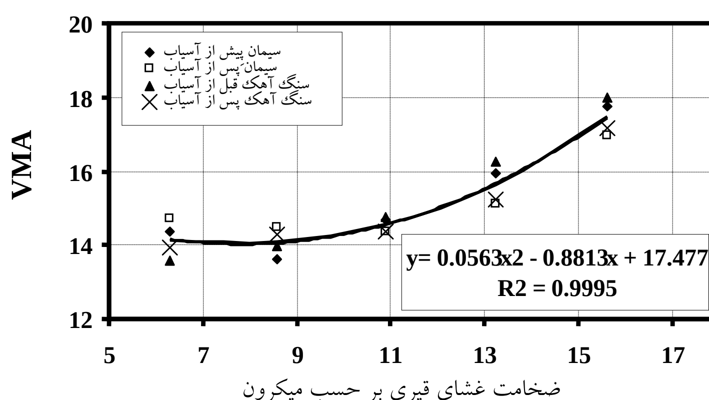
شکل ۷ تغییرات ضخامت غشایی بر حسب درصد قیر



شکل ۸ تغییرات پایداری مارشال بر حسب ضخامت غشایی



شکل ۹ ارتباط حجم هوای مخلوط و ضخامت غشایی



شکل ۱۰ ارتباط حجم منفذها سنگدانه و ضخامت غشایی

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

یکی از معیارهای مهم در طراحی مخلوط‌های آسفالتی، بررسی نسبت‌های حجمی مانند وزن مخصوص و حجم منفذها در مخلوط است و پرکننده نقش اساسی در تغییرات حجمی مخلوط دارد. نوع، میزان و ویژگی‌های فیزیکی، هندسی و شیمیایی پرکننده روی نسبت های حجمی و ضخامت غشای قیری اطراف سنگدانه‌ها اثر می‌گذارند. با کوچک شدن ابعاد، اندازه و دانه‌بندی ذرات پرکننده، سطح ویژه آنها افزایش یافته و سطح تماسی بزرگتری با قیر حاصل می‌شود که حاصل آن پراکنش همگن ذرات پرکننده در قیر و جذب سطحی بالاتر خواهد بود. همچنین مقدار قیر بیشتری نیاز است تا سطح ذرات را به طور کامل پوشش دهد. در پرکننده سیمانی به دلیل کوچکتر بودن ابعاد ذرات سیمان، سطح جانبی بزرگتر و سطح تماس بیشتری با قیر فراهم است که حاصل آن فعل و انفعالات شیمیایی بیشتر با قیر است. اگر نسبت قیر به پرکننده کم باشد، مقاومت مارشال و وزن مخصوص کاهش یافته و حجم هوا افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش میزان قیر تا حد معینی، وزن مخصوص و استحکام مارشال افزایش و در مقابل حجم منفذهای کاهش می‌یابد. این نتیجه بیانگر آن است که در تعیین قیر بهینه، باید به اندازه ذرات پرکننده نیز توجه شود. مقایسه روابط مختلف در تعیین ضخامت غشایی نشان می‌دهد، این مشخصه تابعی از میزان قیر و سطح جانبی ذرات

است. همیشه نظر کسانی در تعیین سطح جانبی وجود ندارد، ولی رابطه انستیتو آسفالت، بیشتر مورد قبول است و نتیجه های کوچکتری را برای سطح جانبی نشان می‌دهد. با افزایش میزان قیر، ضخامت غشای قیری افزایش می‌یابد. تحلیل آماری نشان داد که ارتباط منطقی بین غشای قیری و مؤلفه‌های حجمی مخلوط وجود دارد. با افزایش غشای قیری حجم هوای مخلوط (V_a) کاهش و حجم منفذهای سنگدانه (VMA) افزایش پیدا می‌کند.

مراجع

1. Terhi, K. and Pellinen A., "The Effect of Volumetric Properties on Mechanical Behavior of Asphalt Mixtures", Transportation Research Board, 82nd Annual Meeting, Washington, (2003).
2. Cooley L., Brown, E., Hanson, D., and Fletcher, M., "Characterization of Asphalt-Filler Mortars with Superpave Binder Tests", *J. Assn. of Asphalt Paving Technologists*, 67, pp. 42-65, (1998).
3. Christensen, D., and Bonaquist, R., "Advanced Asphalt Technologies", NCHRP Projects 9-25 and 9-31, Draft Final Report, (2004).
4. Kandhal, P., and Chakraborty, S., "Evaluation of Voids in the Mineral Aggregate for HMA Paving Mixtures", NCAT Report 96-4, National Center for Asphalt Technology, (1996).
5. Hinrichsen, J., and Heggen, J., "Minimum Voids in Mineral Aggregate in Hot-Mix Asphalt Based on Gradation and Volumetric Properties", Transportation Research Record, No. 1545, Washington, pp. 75–79, (1996).
6. Anderson, R.M., and Bahia H., "Evaluation and Selection of Aggregate Gradations for Asphalt Mixtures Using Superpave", Transportation Research Record, No. 1583, Washington, pp. 91–97, (1997).
7. Kandhal, P.S., and Chakraborty S., "Evaluation of Voids in the Mineral Aggregate for HMA PavingMixtures", National Center for Asphalt Technology, Report 96-4, (1996).
8. Ninghui, W., Chuangmin, L., and Chao, Q."Measurement Method of Critical Voids in the Mineral Aggregate of AC-20", *ASCE Proceedings of the Second International Conference on Transportation Engineering*, (2009).
9. Nukunya, B., Roque, R., Tia, M., and Birgisson, B., "Evaluation of VMA and Other Volumetric Properties as Criteria for the Design and Acceptance of Superpave Mixtures", *J. of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 79, pp. 38–69, (2002).
10. Coree B.J., and Hislop, W. P. "A Laboratory Investigation into the Effects of Aggregate-related Factors on Critical VMA in Asphalt Paving Mixtures", *J. of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 79, pp. 70–131, (2002).
11. Brown, E. R., and Cross, S. A., "A National Study of Rutting in Hot Mix Asphalt (HMA) Pavements", *J. of the Association of the Asphalt Paving Technologist*, 61 pp. 535-582, (1992).
12. Radovskiy, B., "Analytical Formulas for Film Thickness in Compacted Asphalt Mixture", Transportation Research Board, 82nd Annual Meeting, Washington, (2003).
13. Li, X., Williams C. R., Mihai, O., Marasteanu, R. and Johnson, E., "Investigation of In-Place Asphalt

Film Thickness and Performance of Hot-Mix Asphalt Mixtures", *J. of Mat. in Civil Eng.*, 21(6), pp. 262-270, (2009).

14. Ramadan, K. Z. and Ashteyat, A. M., " Utilization of white cement bypass dust as filler in asphalt concrete mixtures", *Canadian J. of Civil Eng.*, 36(2), pp. 191-195, (2009).
15. McLeod N. W., "Relationships between Density, Bitumen Content, and Voids Properties of Compacted Bituminous Paving Mixtures", *Proceedings of Highway Research Board*, 35, (1956).
16. Smith, B. J. and Hesp, S., "Crack Pinning in Asphalt Mastic and Concrete: Regular Fatigue Studies", *Int. Transp. Res. Rec. 1728,* Washington, pp. 75-81, (2002).
17. Kandhal, P.S. and Chakraborty, S., "Evaluation of Voids in the Mineral Aggregate for HMA Paving Mixtures", National Center for Asphalt Technology, Report 96-4, (1996).
18. Brown, E. R., Michael, L., Dukatz, E., Scherocman, J., Huber, G., Sines, R., D’Angelo, J. and Williams, C., "Performance of Coarse-Graded Mixes at WesTrack-Premature Rutting", FHWA Final Report RD 99-134, (1998).
19. Nukunya, B., Roque, R., Tia, M. and Birgisson, B., "Evaluation of VMA and Other Volumetric Properties as Criteria for the Design and Acceptance of Superpave Mixtures", *J. of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 79, pp. 38–69, (2002).
20. Anani, B. A., and Swailmi, S. H., "Effects of Field Control of Filler Contents and Compaction on Asphalt Mix Properties", Transportation Research, 1217, pp. 29-37,(1986).
21. Richardson, C., "*The Modern Asphalt Pavement*", John Wiley&Sons, Inc., New York,(1941).
22. Lesueur, D. and Little, D. N., "Effect of Hydrated Lime on Rheology, Fracture, and Aging of Bitumen" Int. Transp. Res. Rec. 1661, Washington, pp. 93-105, (1998).
23. Hopman, P., Vanelstraete, A., Verhasselt, A. and Walter, D., "Effects of Hydrated Lime on the Behaviour of Mastics and on Their Construction Ageing", Proc. of the Durable and Safe Road Pavements, *Int. Conf., Poland,* 1, pp. 59-67, (1999).
24. Randy, C. W. and Robert, S. J., "Evaluation of Lime Kiln Dust as a Mineral Filler in Stone Matrix Asphalt", Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, (2006).
25. The Asphalt Institute, "*Mix design methods for asphalt concrete and other hot mix types*", 6th edition, (1993).
26. Chapuis, R.P. and Legare, P., "A Simple Method for Determination the Surface Area of Fine Aggregates and Fillers in Bituminous Mixtures", ASTM STP 1147, Philadelphia, (1992).
27. Duriez, M. and Arrambide, J., "*Nouveau Traite de Materiaux de Construction*", Paris, (1962).
28. Kandhal, P.S., Foo, K.Y. and Mallick, R.B., "A Critical Review of VMA Requirements in SuperPave", NCAT Report, 98-1, Auburn University, (1998).